

Abstract (Basic): JP 2001074955 A<sup>1</sup>

NOVELTY - Stripe layers (2,2n,2n+1,2n+2) consisting of linear elements, are laminated periodically. The elements are distributed in parallel at mutually fixed intervals. A linear defective section (3) is formed in linear elements partially.

DETAILED DESCRIPTION - The linear elements in the specific layer crosses orthogonally with other elements. The linear element array has photonic crystal from which only half of the fixed pitch is deviated to the array. The refractive index of each element is higher than air.

USE - For optical signal transmission.

ADVANTAGE - Low loss waveguide is realized, by minimizing curvature of branch structures.

DESCRIPTION OF DRAWING(S) - The figure shows the top view of photonic crystal waveguide.

Linear defective section (3)

Stripe layers (2,2n,2n+1,2n+2)

pp; 8 DwgNo 3/9

Title Terms: PHOTON; CRYSTAL; WAVEGUIDE; OPTICAL; SIGNAL; TRANSMISSION;  
LAMINATE; STRIPE; LAYER; DEFECT; SECTION; LINEAR; ELEMENT

Derwent Class: P81; V07

International Patent Class (Main): G02B-006/122

File Segment: EPI; EngPI

Manual Codes (EPI/S-X): V07-F01A5; V07-G11

Am4

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2001-74955  
(P2001-74955A)

(43) 公開日 平成13年3月23日 (2001.3.23)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	データベース* (参考)
G 0 2 B 6/122		G 0 2 B 6/12	A 2 H 0 4 7 D

審査請求 未請求 請求項の数 4 O L (全 8 頁)

(21) 出願番号 特願平11-246074  
(22) 出願日 平成11年8月31日 (1999.8.31)

(71) 出願人 599070433  
野田 進  
京都府宇治市五ヶ庄官有地 京都大学職員  
宿舍323  
(71) 出願人 000003067  
ティーディーケー株式会社  
東京都中央区日本橋1丁目13番1号  
(72) 発明者 野田 進  
京都府宇治市五ヶ庄官有地 京都大学職員  
宿舍231  
(74) 代理人 100082865  
弁理士 石井 陽一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 フォトニック結晶導波路

(57) 【要約】

【課題】 3次元フォトニック結晶を利用した低損失で小型の導波路を提供する。

【解決手段】 複数の線状体が互いに平行に一定のピッチで周期的に配列したストライプ状の層を有し、この層が複数積層され、一方の側からn番目の層における線状体とn+1番目の層における線状体とが直交しており、一方の側からn番目の層における線状体とn+2番目の層における線状体とが平行であり、n番目の層における線状体の配列が、n+2番目の層における線状体の配列に対し、前記一定のピッチの半分だけずれているフォトニック結晶を有し、前記フォトニック結晶の一方および他方のいずれの端部にも位置しない少なくとも1層の層において、少なくとも1つの線状体の少なくとも一部が欠損して線状欠陥が形成されており、この線状欠陥が導波路として機能するフォトニック結晶導波路。

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 空気より屈折率の高い物質から構成される複数の線状体が互いに平行に一定のピッチで周期的に配列してなるストライプ層を有し、このストライプ層が複数積層され、一方の側から $n$ 番目のストライプ層における線状体と $n+1$ 番目のストライプ層における線状体とが直交しており、一方の側から $n$ 番目のストライプ層における線状体と $n+2$ 番目のストライプ層における線状体とが平行であり、 $n$ 番目のストライプ層における線状体の配列が、 $n+2$ 番目のストライプ層における線状体の配列に対し、前記一定のピッチの半分だけずれているフォトニック結晶を有し、

前記フォトニック結晶の一方および他方のいずれの端部にも位置しない少なくとも1層のストライプ層において、少なくとも1つの線状体の少なくとも一部が欠損して線状欠陥が形成されており、この線状欠陥が導波路として機能するフォトニック結晶導波路。

【請求項2】 隣接する一対のストライプ層のそれぞれに前記線状欠陥が存在し、一方のストライプ層の線状欠陥と他方のストライプ層の線状欠陥とが重なって $90^\circ$  曲げ導波路または分岐導波路を構成している請求項1のフォトニック結晶導波路。

【請求項3】 複数の前記 $90^\circ$  曲げ導波路からなる螺旋状導波路を有する請求項2のフォトニック結晶導波路。

【請求項4】 前記線状欠陥の存在するストライプ層から前記フォトニック結晶の一方および他方のそれぞれの端部までの間に、5以上のストライプ層が存在する請求項1～3のいずれかのフォトニック結晶導波路。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、3次元フォトニック結晶中に欠陥を設けることにより導波路を形成したフォトニック結晶導波路に関する。

## 【0002】

【従来の技術】近年、フォトニック結晶と呼ばれる材料が注目を集めている（例えば、Physical Review Letter s vol.58.p2059-2062 (1987)（文献1）、Japanese Journal of Applied Physics.vol.35,p909-912 (1996)（文献2））。フォトニック結晶とは、その内部に周期的な屈折率分布をもつ結晶であり、フォトニックバンドギャップを形成することにより、自然放光の制御等、微小領域における自在な光の制御を可能とするものである。

【0003】フォトニックバンドギャップを持つフォトニック結晶に欠陥を線状に導入すると、その欠陥に沿って光が導波されるため、導波路として利用できる。

【0004】フォトニック結晶に欠陥を導入して導波路を形成した例としては、Physical Review Letters. Vol. 77,p3787-3790 (1996)（文献3）、第46回応用物理

学関係連合講演会講演予稿集, 29p-E-11 (1999)（文献4）がある。文献3は、2次元のフォトニック結晶に線状欠陥を導入して形成した導波路の解析を行っており、 $90^\circ$ の曲げでも高い透過特性が得られることを示している。文献4は、3次元のフォトニック結晶に線状欠陥を導入して形成した導波路の解析を行っており、欠陥に電界が集中することを示している。

## 【0005】

【発明が解決しようとする課題】フォトニック結晶に線状の欠陥を導入することにより導波路が形成されることはよく知られているが、いかなる欠陥を導入するのが効果的なかは未だよく検討されていない。2次元のフォトニック結晶については文献3に示されるように検討されているが、完全結晶であるために損失の少ない導波路が期待される3次元結晶については、具体的には検討されていない。文献4では、3次元フォトニック結晶に導入した直線状導波路の解析を行っているが、欠陥の具体的な導入方法についての検討はなされていない。また、文献4における解析は直線状導波路についてのみであり、曲げあるいは分岐構造を導入した導波路に関しては解析されていない。

【0006】本発明はこのような事情からなされたものである。本発明は、3次元フォトニック結晶を利用した低損失で小型の導波路を提供することを目的とする。

## 【0007】

【課題を解決するための手段】上記目的は、下記（1）～（4）の本発明により達成される。

（1） 空気より屈折率の高い物質から構成される複数の線状体が互いに平行に一定のピッチで周期的に配列してなるストライプ層を有し、このストライプ層が複数積層され、一方の側から $n$ 番目のストライプ層における線状体と $n+1$ 番目のストライプ層における線状体とが直交しており、一方の側から $n$ 番目のストライプ層における線状体と $n+2$ 番目のストライプ層における線状体とが平行であり、 $n$ 番目のストライプ層における線状体の配列が、 $n+2$ 番目のストライプ層における線状体の配列に対し、前記一定のピッチの半分だけずれているフォトニック結晶を有し、前記フォトニック結晶の一方および他方のいずれの端部にも位置しない少なくとも1層のストライプ層において、少なくとも1つの線状体の少なくとも一部が欠損して線状欠陥が形成されており、この線状欠陥が導波路として機能するフォトニック結晶導波路。

（2） 隣接する一対のストライプ層のそれぞれに前記線状欠陥が存在し、一方のストライプ層の線状欠陥と他方のストライプ層の線状欠陥とが重なって $90^\circ$  曲げ導波路または分岐導波路を構成している上記（1）のフォトニック結晶導波路。

（3） 複数の前記 $90^\circ$  曲げ導波路からなる螺旋状導波路を有する上記（2）のフォトニック結晶導波路。

(4) 前記線状欠陥の存在するストライプ層から前記フォトニック結晶の一方および他方のそれぞれの端部までの間に、5以上のストライプ層が存在する上記(1)~(3)のいずれかのフォトニック結晶導波路。

【0008】

【発明の実施の形態】一般にフォトニック結晶とは、その内部に周期的な屈折率分布をもつ光学材料である。フォトニック結晶中では、固体結晶において原子核により構成される周期的なポテンシャル分布によってバンドギャップが形成されるのと同様な原理で、光子のエネルギーに対してフォトニックバンドギャップが形成される。その結果、フォトニックバンドギャップに相当するフォトンエネルギーをもつ光は、フォトニック結晶中を伝搬しない。このような機能をもつフォトニック結晶は、超小型光回路や光デバイスへの応用が期待されている。

【0009】周期的な屈折率分布が1次元のものは古くから多層薄膜として知られており、あえてフォトニック結晶と呼ばれることもないが、2次元的な屈折率分布をもつ構造のものからフォトニック結晶としての特徴が現れ始め、3次元的な屈折率分布をもつ構造をとることにより、完全結晶が形成可能となる。この完全結晶とは、全方向において光の閉じ込めが可能な構造であり、3次元屈折率分布がダイヤモンド構造または非対称面心立方構造をとるものである。本発明では、3次元フォトニック結晶を用い、この結晶中に欠陥を設けることにより光導波路を形成する。本発明の光導波路に利用する3次元フォトニック結晶の概要については、例えば、電子情報通信学会誌Vol. 82, No. 3, pp. 232-241 (1999) (文献5)、光学, 27巻1号, pp. 6-11 (1998) (文献6)などに記載されている。

【0010】本発明のフォトニック結晶導波路の構成例を、図1(A)に示す。このフォトニック結晶導波路は、3次元フォトニック結晶中に導波路を形成したものである。この3次元フォトニック結晶は、空気/半導体回折格子からなるストライプ層、すなわち、互いに平行な複数の線状体が一定のピッチで配列してなるストライプ層、を3次元的に積層することにより、非対称面心立方構造を形成したものである。なお、非対称面心立方構造とは、非対称な格子点をもつ面心立方構造を意味する。この3次元フォトニック結晶における格子点は、線状体の交差点である。

【0011】この3次元フォトニック結晶では、ストライプ層積層方向の一方の側から $n$ 番目のストライプ層 $2_n$ における線状体と、 $n+1$ 番目のストライプ層 $2_{n+1}$ における線状体とが直交している。また、 $n$ 番目のストライプ層 $2_n$ における線状体と $n+2$ 番目のストライプ層 $2_{n+2}$ における線状体とが平行であり、かつ、 $n$ 番目のストライプ層 $2_n$ における線状体の配列が、 $n+2$ 番目のストライプ層 $2_{n+2}$ における線状体の配列に対し、前記一定のピッチの半分だけずれている。

【0012】このように、 $n$ 番目のストライプ層 $2_n$ における線状体の配列周期に対し $n+2$ 番目のストライプ層 $2_{n+2}$ における線状体の配列周期を半位相分シフトさせることにより、非対称面心立方構造が形成される。すなわち、直交するストライプ構造を2層積層することにより面心立方構造の $\{001\}$ 面が形成され、さらに、この $\{001\}$ 面を上記のようにシフトして積層することにより、面心立方構造に非対称性が導入される。このフォトニック結晶では、4層のストライプ層が1単位となって同一構造が繰り返されるので、ストライプ層の積層数は、通常、4の整数倍とする。なお、図示例ではフォトニック結晶のうち1単位分だけを表示し、他のストライプ層の表示は省略してある。

【0013】このように非対称面心立方構造とするのは、光の全伝搬方向に対してフォトニックバンドギャップを形成するため、すなわち完全結晶を得るためである。3次元的な屈折率分布をもつ周期的な構造のすべてがフォトニックバンドギャップを有するのではなく、フォトニックバンドギャップを形成するためには、一般に、ダイヤモンド構造またはそれに準ずる非対称面心立方構造が必要と考えられている。

【0014】このような3次元フォトニック結晶中に導波路を設けるためには、結晶中に線状欠陥を形成する必要がある。本発明では、図1(A)に示すように、周期的に配列した線状体のうちの1本に欠損部3を設けることにより、線状欠陥を形成する。図中において欠損部3は白抜きの線状体として表示してあるが、この白抜き部分は、実際にはその周囲と同様に空気である。なお、図中には電磁波の進行方向を矢印で示してある。

【0015】ところで、例えば前記文献4に記載されているように、空気/半導体回折格子の積層構造を用いた3次元フォトニック結晶において、線状欠陥を設けることにより導波路が形成できることは知られている。しかし、従来、具体的にどのようにして線状欠陥を設けるかについては、検討されていない。図1に示されるように線状体を1本欠損させることにより線状欠陥を形成する方法には、導波路に存在する電界モードが1つとなる、すなわち、単一モードが得られる、という利点がある。

【0016】図1(B)に、フォトニック結晶導波路の他の構成例を示す。この導波路は、線状体の配列ピッチとはほぼ同じ長さの欠損部3をもつ線状体を複数設け、これら複数の欠損部3を、線状体延在方向に対し直交する方向に一列に配列することにより構成されている。この構成においても、図1(A)の構成と同様な作用効果が実現する。図1(B)に示す欠損部3の長さは、線状体の配列ピッチの1倍とすることが最も好ましいが、通常は配列ピッチの0.6~1.4倍、好ましくは0.8~1.2倍であれば問題ない。この長さが短すぎると、導波モードが存在しなくなることがあり、長すぎると、マルチモードが存在することがある。

【0017】本発明では、フォトニック結晶中に、 $90^\circ$  曲げ導波路または分岐導波路を形成することができる。図2に、 $90^\circ$  曲げ導波路の構成例を示す。この構成例では、1つのストライプ層2において、図1(A)の構成と同様な長い欠損部31をもつ線状体を1つ設けて第1の導波路を形成すると共に、図1(B)の構成と同様な短い欠損部32をもつ線状体を複数設け、これら複数の欠損部32を線状体延在方向に對し直交する方向に一列に配列させて第2の導波路としている。この構成例では、前記第1の導波路と前記第2の導波路とが $90^\circ$  曲げ導波路を構成している。図示例において、直交する2本の導波路のいずれか一方または両方を延長すれば、T字型分岐導波路(2分岐導波路)またはX字型分岐導波路(3分岐導波路)を構成することができる。

【0018】図2では、直交する2本の導波路を1つのストライプ層に形成しているため、前記2本の導波路の構造が異なっている。そのため、曲げの前後または分岐の前後において導波モードが異なることになり、その結果、電磁波がスムーズに結合せず、曲げまたは分岐の際の反射による損失が大きくなってしまふ。このような損失を抑えるため、 $90^\circ$  曲げ導波路は図3に示す構成とし、T字型分岐導波路は図4または図5に示す構成とし、X字型分岐導波路は図6に示す構成とすることが好ましい。なお、図3～図6は、線状体に設けた欠損部を見やすくするために、隣接する2層のストライプ層だけを表示した平面図としてある。これら各図の(A)は、図1(A)の構成例と同様に、1本の線状体の少なくとも一部に欠損部を設けることにより線状欠陥を形成しており、これら各図の(B)は、図1(B)の構成例と同様に、配列ピッチとほぼ同じ長さの欠損部を有する線状体を複数設けることにより線状欠陥を形成している。

【0019】図3～図6にそれぞれ示す構成例では、隣接する一対のストライプ層 $2_n$ 、 $2_{n+1}$ のそれぞれにおいて、線状体の少なくとも一部に欠損部 $3_n$ 、 $3_{n+1}$ を設けることにより線状欠陥を形成し、一方のストライプ層 $2_n$ の欠損部 $3_n$ と他方のストライプ層 $2_{n+1}$ の欠損部 $3_{n+1}$ とを重ねている。このように、隣接する一対のストライプ層において、段違い状態で交差する2本の線状体の交差部を欠損させることにより段違い状態の交差欠陥を形成すれば、一方のストライプ層の線状欠陥を進んできた電磁波の少なくとも一部は、導波モードが変化することなく他方のストライプ層の線状欠陥に進む。したがって、図3～図6にそれぞれ示す導波路では、曲げおよび分岐に伴う損失を著しく低減できる。

【0020】図4に示すT字型分岐導波路と図5に示すT字型分岐導波路とは全く同じ構造であり、電磁波の分岐方向だけが異なる。すなわち、図4においてストライプ層 $2_{n+1}$ または $2_n$ に形成された第1の導波路を進んできた電磁波は、ストライプ層 $2_n$ または $2_{n+1}$ に形成された第2の導波路に進み、第2の導波路において $180^\circ$

異なる方向に2分岐される。一方、図5においてストライプ層 $2_{n+1}$ または $2_n$ に形成された第1の導波路を進んできた電磁波は、その一部がそのまま第1の導波路を進み、残りがストライプ層 $2_n$ または $2_{n+1}$ に形成された第2の導波路に進むことにより、2分岐される。図4の構成においても図5の構成においても分岐比はほぼ1:1となるが、図4の構成のほうが効率が高くなるため好ましい。

【0021】図3(A)に示す $90^\circ$  曲げ導波路を構成する場合、交差する両欠損部の交点からそれぞれの欠損部の突き出る長さは、線状体の配列ピッチの0.5倍であることが最も好ましいが、通常は配列ピッチの0.3～0.7倍、好ましくは0.4～0.6倍であれば問題ない。この長さが短すぎても長すぎても、特定の波長域で透過率の減衰が生じてしまふ。

【0022】また、図4(A)および図5(A)に示すT字型分岐導波路を構成する場合、両欠損部の交点からT字の縦棒に相当する欠損部の突き出る長さは、図3(A)に示す $90^\circ$  曲げ導波路における上記突き出る長さと同様とすることが好ましい。その限定理由は、 $90^\circ$  曲げ導波路の場合と同様である。

【0023】図7に、螺旋状導波路の構成例を示す。この螺旋状導波路は、連続する4層のストライプ層のそれぞれに欠損部3を設け、かつ、隣接するストライプ層間で欠損部3同士を重ねることにより、図3(A)に示す構造の $90^\circ$  曲げ導波路を3つ接続して形成したものである。この構造では、電磁波は $90^\circ$  曲げ導波路を1回通過すごとにストライプ層を1層移動することになる。したがってこの螺旋状導波路では、2次元フォトニック結晶では不可能な電磁波の3次元的な進行が可能である。なお、 $90^\circ$  曲げ導波路の接続数は、必要に応じて決定すればよい。このような螺旋状導波路は、図3(B)に示す $90^\circ$  曲げ導波路を複数接続することによっても実現できる。

【0024】本発明では、3次元フォトニック結晶の特徴をいかにするために、線状欠陥を導入するストライプ層を、フォトニック結晶の一方および他方のいずれの端部にも位置させない必要がある。すなわち、線状欠陥の存在するストライプ層からフォトニック結晶の一方および他方のそれぞれの端部までの間に、少なくとも1つ、好ましくは5以上のストライプ層を存在させる。線状欠陥を導入したストライプ層の両側に存在するストライプ層の数が少なすぎると、導波路の損失が大きくなってしまふ。なお、図1～図7では、線状欠陥を明瞭に示すために線状欠陥をもつストライプ層を最上層として表示してあるが、実際には、その上にさらにストライプ層を積層する。

【0025】フォトニック結晶における各種パラメータ、例えば、線状体の屈折率、寸法および配列ピッチは特に限定されない。フォトニックバンドギャップはこれ

らのパラメータによって変化するので、これらのパラメータは導波路が適用される波長に応じて適宜決定すればよい。

【0026】以上では、線状体の構成材料を半導体して説明したが、線状体の構成材料は、空気よりも屈折率の高い物質であればよく、半導体、誘電体、導電体等のいずれであってもよい。半導体材料としては、例えばGaAs、GaP等のIII-V族化合物半導体、CdTe等のI-VI族化合物半導体、Si、Ge等のIV族半導体などのいずれであってもよい。ただし、本発明のフォトニック結晶導波路を光回路や光デバイスの一部に組み込んで使用する場合、または、導波路に加え光回路や光デバイスをフォトニック結晶中に一体的に形成する場合には、導波路以外の構成要素を考慮して、線状体構成材料を適宜選択する。また、構成材料を適宜選択することにより、フォトニック結晶を容易に製造することも可能となる。例えば、後述する製法を利用する場合には、適用可能なエッチングプロセスが豊富であることから、Gaおよび/またはAsを含有する半導体材料を用いることが好ましい。

【0027】線状体構成材料の屈折率は、好ましくは2以上、より好ましくは3以上である。線状体構成材料の屈折率が低すぎると、フォトニックバンドギャップを形成することが難しくなる。

【0028】次に、本発明の導波路の製造に利用できる好ましい方法について、図8を用いて説明する。なお、本発明で用いる3次元フォトニック結晶については、その製造方法の一部が前記文献5および文献6に記載されている。

【0029】図8(A)に示す工程では、GaAsからなる基板10上に、例えばMBE法を用い、基板温度を例えば600℃として、AlGaAs層11およびGaAs層12をこの順で結晶成長させる。AlGaAs層11は、後にエッチングストップ層となり、GaAs層12は後にストライプ層となる。

【0030】図8(B)に示す工程では、フォトリソグラフィとRIE(Reactive Ion Etching)とを利用してGaAs層12をストライプ状に形状加工し、ストライプ層2を得る。このとき必要に応じ、少なくとも1本の線状体の少なくとも一部が欠損するようにパターニングを行って、線状欠陥を導入する。反応ガスには、例えば $H_2 + CH_4$ 混合ガスを用いることができる。

【0031】図8(C)に示す工程では、上記各工程を経て製造された全く同一のストライプ層2をそれぞれ有する2枚の基板10を、ストライプ層2同士が接するように重ね合わせ、ストライプ層同士を接合する。この接合に先だって、あらかじめ接合面をBHF(buffered HF)溶液に浸して前処理しておくことが好ましい。また、接合の際には、例えば $H_2$ 雰囲気中で例えば650℃程度に加熱することにより、ストライプ層同士を融着

させることが好ましい。

【0032】次に、例えば以下の手順により基板10の一方を取り除くことにより、図8(D)に示すように、基板10上に2層のストライプ層2が積層された状態とする。まず、図8(C)に示す状態において、基板10の一方を研磨して薄くする。続いて、例えば $NH_4OH$ 溶液と $H_2O_2$ 溶液とを混合したエッチング液により、研磨したほうの基板10を選択的に溶解させる。このとき、基板10とストライプ層2との間に存在するAlGaAs層11が、エッチングストップ層として働く。次いで、AlGaAs層11を、HF溶液により取り除く。

【0033】このようにして得た図8(D)に示す状態の基板10同士を、最上層のストライプ層2同士が接するように重ね合わせ、ストライプ層同士を接合する。ただし、このとき、前記した非対称性を導入するために、一方の基板側と他方の基板側とで互いに平行となる線状体の配列をずらしておく必要がある。このとき、接合するストライプ層同士の位置合わせには、レーザー光回折パターンを利用する方法が好ましい。具体的には、互いに平行な回折格子を重ねてレーザー光を入射させると、両回折格子の位置関係に応じて±1次の回折スポットの強度が変化し、両回折格子の位置がちょうど半周期ずれたときに前記スポットの強度が再弱となることを利用する。

【0034】ストライプ層同士を接合した後、前述した手順により一方の基板10を取り除けば、図8(E)に示すように、基板10上に4層のストライプ層2が積層された状態となる。

【0035】以上の工程を繰り返すことにより、4層のストライプ層を1単位として、任意数の単位が積層されたフォトニック結晶導波路を得ることができる。

【0036】次に、本発明のフォトニック結晶導波路の具体例について、特性を示す。

【0037】線状体をGaAsから構成し、フォトニック結晶の格子定数(線状体の配列ピッチ)をaとして、線状体の幅(配列方向の寸法)は0.25a、高さは0.3aとした。フォトニック結晶中に線状欠陥を形成していない場合には、規格化周波数 $c/a$ (cは光速)が0.380から0.444の間にバンドギャップが形成された。

【0038】これに対し、図1(A)に示すように1本の線状体を欠損させることにより、結晶のX軸方向に延びる線状欠陥を設けた場合について時間領域差分(FDTD)法により解析したところ、バンドギャップ内に電磁界パターンが得られた。このときの導波モードは電界がZ軸(ストライプ層に垂直な軸)に対して平行に分極しているモードのみであり、X軸に平行に分極した電界のモードは導波しなかった。この結果から、線状欠陥を設けることにより導波路が形成されたことが確認され

た。

【0039】図9に、フォトニック結晶導波路中の $k$ 空間における $k-\omega$ の分散関係を示す。同図から、幅広い周波数域にわたってモードが存在していること、また、単一モードができていないこと、また、線形性が比較的良好であることがわかる。

【0040】なお、図1(B)に示す構造とした場合でも、図1(A)の構造の場合とほぼ同じ結果が得られた。

【0041】図3(A)に示す $90^\circ$ 曲げ導波路について解析したところ、電磁波は、段違いに交差する上下の線状導波路の間を同一モードでスムーズに結合し、 $90^\circ$ 曲がって進行した。この導波路では、 $90^\circ$ 曲げ前後の電界強度はほぼ一致した。すなわち、導波路の透過率はほぼ1であり、損失をほぼ完全に抑制できることがわかった。なお、図3(B)に示す構造とした場合でも、ほぼ同じ結果が得られた。

【0042】一方、図2に示す $90^\circ$ 曲げ導波路について解析したところ、 $90^\circ$ 曲げ前後で導波モードが一致しなかった。そのため、電磁波がスムーズに結合せず、導波路の透過率は約0.5となった。

【0043】また、図4および図5に示すT字型分岐導波路について解析したところ、電磁波はほぼ分岐比1:1の割合で2分岐した。

【0044】また、図6に示すX字型分岐導波路について解析したところ、電磁波はほぼ分岐比1:1:1の割合で3分岐した。

【0045】

【発明の効果】本発明では、フォトニックバンドギャップを有する3次元フォトニック結晶を利用して、低損失導波路を実現することができる。また、本発明では、導波路を各種光回路に適用するために有用な曲げ構造および分岐構造を、フォトニック結晶中に導入できる。通常

の導波路では、曲げ損失を極力小さくするためにその曲率半径を大きくするが、フォトニック結晶ではフォトニックバンドギャップの存在により光を遮断するため、急峻に曲げることが可能である。そのため、本発明では、光回路の大きさを大幅に縮小することができる。また、本発明において、導波路を分岐導波路形状とすれば、超小型光分岐器が実現する。

【図面の簡単な説明】

【図1】(A)および(B)は、本発明のフォトニック結晶導波路の構成例を示す斜視図である。

【図2】本発明のフォトニック結晶導波路に $90^\circ$ 曲げ構造を導入した構成例を示す斜視図である。

【図3】(A)および(B)は、本発明のフォトニック結晶導波路に $90^\circ$ 曲げ構造を導入した構成例を示す平面図である。

【図4】(A)および(B)は、本発明のフォトニック結晶導波路にT字型分岐構造を導入した構成例を示す平面図である。

【図5】(A)および(B)は、本発明のフォトニック結晶導波路にT字型分岐構造を導入した構成例を示す平面図である。

【図6】(A)および(B)は、本発明のフォトニック結晶導波路にX字型分岐構造を導入した構成例を示す平面図である。

【図7】本発明のフォトニック結晶導波路に螺旋状構造を導入した構成例を示す斜視図である。

【図8】(A)～(E)は、本発明のフォトニック結晶導波路を製造する方法を説明する斜視図である。

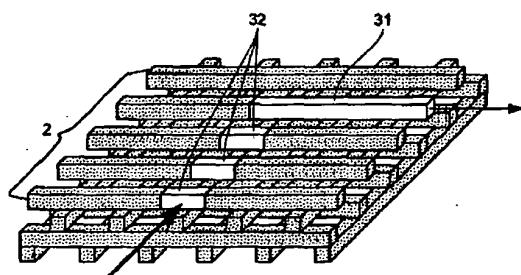
【図9】フォトニック結晶中の $k$ 空間における $k-\omega$ の分散関係を示すグラフである。

【符号の説明】

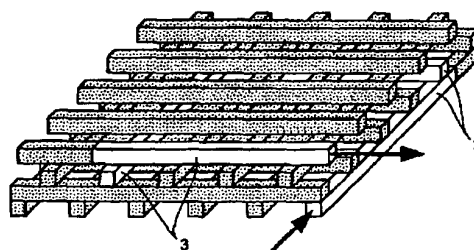
2、 $2_n$ 、 $2_{n+1}$ 、 $2_{n+2}$  ストライプ層

3、 $3_n$ 、 $3_{n+1}$ 、31、32 欠損部

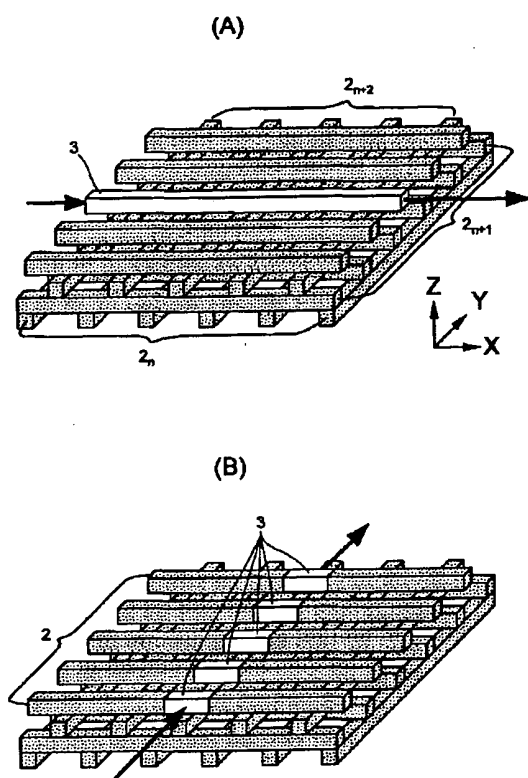
【図2】



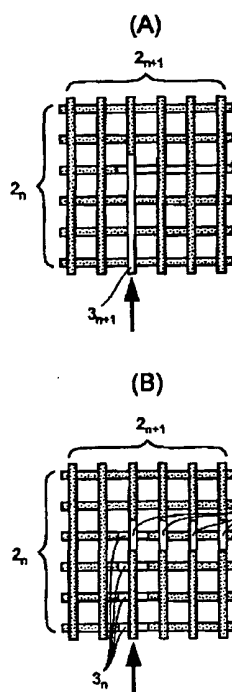
【図7】



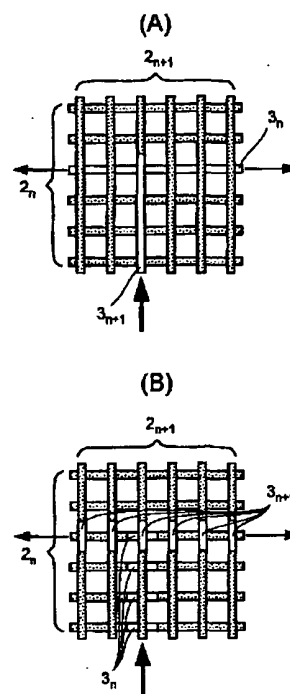
【図1】



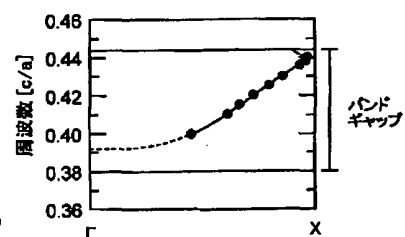
【図3】



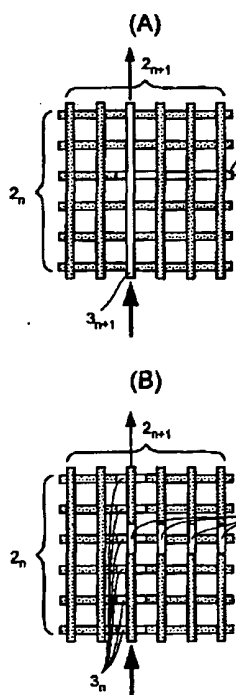
【図4】



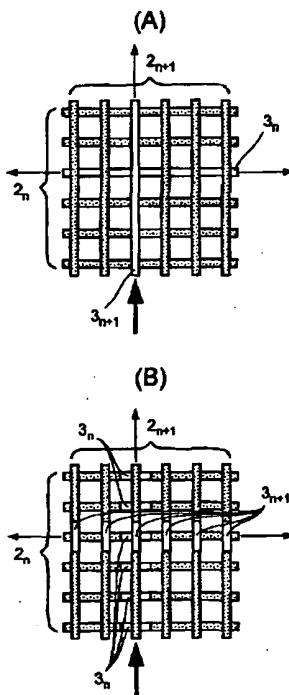
【図9】



【図5】

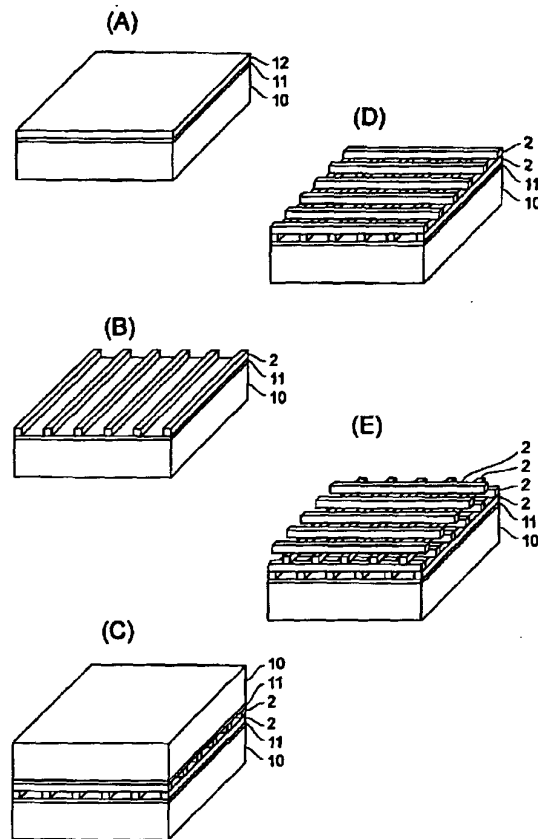


【図6】





【図8】



フロントページの続き

(72)発明者 チュティナン アロンカーン  
京都府中京区河原町通竹屋町上ル大文字町  
232-403

(72)発明者 宮内 大助  
東京都中央区日本橋一丁目13番1号 ティ  
ーディーケイ株式会社内

(72)発明者 成宮 義和  
東京都中央区日本橋一丁目13番1号 ティ  
ーディーケイ株式会社内

Fターム(参考) 2H047 KA01 KA12 LA12 QA02